



Использование цифровой модели продукта в решении задачи оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции

Богинский А.И.¹

¹ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ:

В статье рассмотрена проблема оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективного изделия. Прогнозирование случайных факторов, влияющих на производство перспективной продукции, затруднено, поскольку традиционные методы оптимизации затрат в данном случае неприменимы по причине большой стохастичности задачи оптимизации. Показано, как использование цифровой модели позволяет решить проблему оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективного изделия. Описана экономико-математическая модель оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции, использующая такие научные достижения цифровизации, как цифровой двойник изделия и его цифровой макет. Представлен способ оценки точности при решении стохастической оптимизационной задачи. Разработана методика, позволяющая управлять затратами на этапах жизненного цикла перспективных изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация затрат; жизненный цикл изделия; перспективная продукция; цифровая модель изделия.

The use of a digital product model in solving the problem of cost optimization at the stages of the life cycle of promising products

*Boginskiy A.I.*¹

¹RUDN University, Russia

Введение

В настоящее время проблема оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции является очень актуальной и сложной, поскольку при проектировании и создании перспективных изделий высокотехнологичным предприятиям необходимо учитывать большое количество случайных факторов [4, 6] (*Boginskiy, Chursin, 2018; Borsch, Gerasimova, Tyulin, 2018*). Прогнозирование таких факторов затруднено, поскольку они связаны с новациями, применяемыми в перспективных изделиях [13, 14] (*Nesterov, Boginskiy, Chursin, Yudin, 2019; Nikitin, Morozova, Semenikhina, 2018*). Под перспективными изде-

лиями будем понимать такие виды продукции, для которых характерны прогнозируемая совокупность показателей качества и соответствие передовым научно-техническим достижениям на установленный будущий период.

Заметим, что в данном случае традиционные методы оптимизации затрат оказываются неприменимым по причине большой стохастичности задачи оптимизации [2] (*Batkovskiy, Leonov, Pronin, 2018*). С другой стороны, методы стохастической оптимизации, как правило, дают эффект только в случае массового применения оптимальных решений, поскольку данные методы оптимизируют лишь в среднем, а при создании перспективного изделия нам необходимо снизить затраты в единичном случае.

Для оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции важную роль играет использование цифровых моделей или цифровых макетов изделий [1, 7] (*Abramova, 2018; Kagartanova, Fayzullina, 2018;*). Современная цифровая модель изделия представляет собой большую совокупность различных электронных документов, описывающих перспективное изделие [11, 15] (*Kulikova, 2019; Rozanova, Lineva, 2019*). В частности, цифровая модель содержит электронный документооборот, систему управления компонентами изделия и их трехмерные модели, а также различные технологические и производственные данные [3, 5, 8] (*Biankina, 2017; Boginskiy, Uchenov, Chursin, 2019; Kaplyuchenko, Khlynovskiy, Dolgushev, Morozov, 2017*).

Покажем, как использование цифровой модели позволяет решить задачу оптимизации затрат на этапах жизненного цикла (ЖЦ) перспективного изделия. Для этого

ABSTRACT:

The article deals with the current problem of cost optimization at the stages of the life cycle of a promising product. Prediction of random factors affecting the production of promising products is difficult, because the traditional methods of cost optimization in this case are not applicable due to the large stochasticity of the optimization problem. It is shown how the use of a digital model can solve the problem of cost optimization at the stages of the life cycle of a promising product. The article describes the economic and mathematical model of cost optimization at the stages of the life cycle of promising products, using such scientific achievements of digitalization as a digital counterpart of the product and its digital layout. The method of estimation of accuracy at the solution of stochastic optimization problem is presented. The technique to control the costs of the stages of the life cycle perspective of products is developed.

KEYWORDS: cost optimization, product life cycle, promising products, digital product model

JEL Classification: O31, O32, O33

Received: 02.07.2019 / Published: 31.08.2019

© Author(s) / Publication: CREATIVE ECONOMY Publishers
For correspondence: Boginskiy A.I. (katy-kaplu@yandex.ru)

CITATION:

Boginskiy A.I. [2019] Ispolzovanie tsifrovoy modeli produkta v reshenii zadachi optimizatsii zatrat na etapakh zhiznennogo tsikla perspektivnoy produktsii [The use of a digital product model in solving the problem of cost optimization at the stages of the life cycle of promising products]. *Kreativnaya ekonomika*. 13. (8). – 1563-1572. doi: [10.18334/ce.13.8.40890](https://doi.org/10.18334/ce.13.8.40890)

опишем экономико-математическую модель оптимизации затрат на жизненном цикле перспективной продукции [10, 12] (*Kuleshenko, 2018; Logvinov, Minakov, Minakov, 2018*).

Пусть жизненный цикл перспективной продукции состоит из N различных этапов. Каждый из этих этапов будем обозначать следующим образом:

$$K_1, K_2, \dots, K_N.$$

В качестве этих этапов можно выделить следующие [17, 18] (*Chursin, Vlasov, 2016; Chursin, Tyulin, 2018*):

- маркетинговые исследования;
- проведение научных и поисковых работ;
- проектирование;
- планирование процессов изготовления;
- закупка материалов и комплектующих изделий;
- создание основных компонент;
- сборка изделия;
- монтаж и наладка;
- испытание;
- приемка;
- использование по назначению;
- техническое обслуживание и ремонт;
- утилизация.

Будем рассматривать случай, когда этапы жизненного цикла выполняются последовательно, без параллельного выполнения. Реализация каждого этапа жизненного цикла требует определенных затрат [13] (*Nesterov, Boginskiy, Chursin, Yudin, 2019*). Эту схему приведем на *рисунке 1*.

Общие затраты на реализацию жизненного цикла изделия определяются по формуле:

$$F = (F_1 + \Phi_1) + (F_2 + \Phi_2) + \dots + (F_{N-1} + \Phi_{N-1}) + F_N,$$

где величины Φ_n представляют собой дополнительные затраты, возникающие при подготовке изделия к этапу $(n + 1)$, после реализации этапа n . В частности, эти расходы возникают в результате того, что при выполнении каждого этапа полученные резуль-

ОБ АВТОРЕ:

Богинский Андрей Иванович, кандидат экономических наук, профессор кафедры прикладной экономики (katy-kaplu@yandex.ru)

ЦИТИРОВАТЬ СТАТЬЮ:

Богинский А.И. Использование цифровой модели продукта в решении задачи оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции // Креативная экономика. – 2019. – Том 13. – № 8. – С. 1563-1572. doi: [10.18334/ce.13.8.40890](https://doi.org/10.18334/ce.13.8.40890)

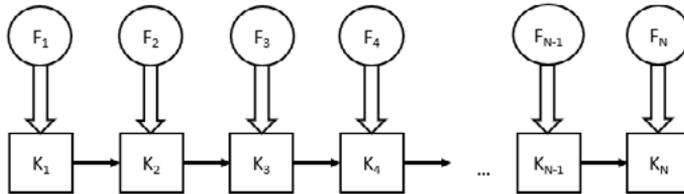


Рисунок 1. Схема финансирования этапов жизненного цикла изделия

Примечание: K_n – этапы жизненного цикла изделия и получаемые после выполнения этих этапов результаты; F_n – финансирование, необходимое на реализацию этапов ЖЦ.

Источник: составлено автором

таты могут отличаться от плановых значений. Для рассматриваемого случая перспективного изделия эти затраты носят случайных характер. Таким образом, мы получаем задачу стохастического программирования.

Для формулирования постановки задачи для стохастической оптимизации введем вероятностное пространство:

$$\Pi = \langle \Omega, \mathcal{B}, P \rangle,$$

где Ω – пространство элементарных исходов, \mathcal{B} – сигма-алгебра событий на множестве Ω , а P – вероятностная мера событий из множества \mathcal{B} . Для каждого элементарного исхода $\omega \in \Omega$ мы имеем следующую оптимизационную задачу:

$$F(\omega, u_1, u_2, \dots, u_N) = \sum (F_n(u_n) + \Phi_n(\xi_n(\omega), u_n)) \rightarrow \min. \quad (1)$$

где u_1, u_2, \dots, u_N – управления на каждом этапе ЖЦ перспективного изделия, выбираемые из множеств возможных управлений по формуле:

$$u_n \in U_n,$$

где U_n – множество возможных или допустимых управлений жизненным циклом продукции. Эти множества должны быть не пустыми. Через $\xi_n(\omega)$ мы обозначили случайные величины.

В практических задачах всегда выполняются условия, что эти случайные величины $\xi_n(\omega)$ имеют конечные первые и вторые моменты:

$$|E[\xi_n(\omega)]| = |E_n| < \infty,$$

$$D[\xi_n(\omega)] = D_n < \infty,$$

где $E[\xi_n(\omega)]$ – математическое ожидание случайной величины, а $D[\xi_n(\omega)]$ – дисперсия случайной величины.

Непосредственное решение задачи оптимизации (1) практически невозможно, поскольку она содержит случайные величины. Стандартные методы решения стохастических задач предлагают замену задачи (1) на задачу, в которой случайные величины заменяются на их математические ожидания, которые характеризуют средние значения этих случайных величин. При этом математические ожидания, как и дисперсии, являются неслучайными величинами.

Таким образом, задачу стохастического программирования (1) можно заменить на задачу математического программирования по следующей формуле:

$$F(u_1, u_2, \dots, u_N) = \Sigma (F_n(u_n) + \Phi_n(E_n, u_n)) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Задача (2) может быть решена стандартными методами оптимизации нелинейных функций.

Однако для рассматриваемого случая оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективного изделия такой подход приведет к большим погрешностям, поскольку замена случайной величины ее математическим ожиданием оправдана только в случае, когда данная оптимизационная задача решается многократно.

Оценить точность при решении стохастической оптимизационной задачи возможно при помощи дисперсии (D_n): чем ниже ее значение, тем меньше разброс значений случайной величины относительно ожидания.

Покажем какую роль в решении задачи оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции играет использование цифровой модели изделия. Цифровая модель изделия позволяет получить точное представление самого изделия на всех этапах создания перспективного изделия, а также иметь точное представление о компонентах изделия [9, 16] (*Kuznetsov, 2018; Streltsov, Yakovlev, 2017*). Поэтому при решении задач оптимизации затрат на этапах жизненного цикла мы имеем точную информацию о предполагаемом изделии. Эта информация может быть использована для уменьшения дисперсии случайных величин, влияющих на затраты на этапах жизненного цикла.

Введем понятие цифрового репера модели перспективного продукта на этапах жизненного цикла. Цифровым репером мы будем называть совокупность информации, которая описывает ожидаемые характеристики изделия на каждом этапе жизненного цикла. Математическое выражение для цифрового репера имеет следующий вид:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (3)$$

где каждый элемент X_n представляет собой k -мерный вектор в пространстве параметров R^k . При этом будем считать, что у нас есть функционалы, которые могут оценить соответствие результатов выполнения этапа жизненного цикла изделия и планируемых параметров, которые соответствуют цифровому реперу. Эти функционалы будем обозначать следующим образом:

$$\Psi_n = \Psi_n(K_n, X_n), \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

Будем считать, что $\Psi_n \geq 0$ и имеют смысл меры расхождения между результатом K_n и параметрами X_n . В случае полного соответствия имеем $\Psi_n = 0$.

Наличие цифровых реперов, получаемых из цифровой модели изделия, позволяет корректировать выполнение каждого этапа жизненного цикла таким образом, чтобы решить экстремальную задачу:

$$\Psi_n(K_n(v_n), X_n) \rightarrow \min, n = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

где через v_n обозначены управляющие воздействия на n -ом этапе жизненного цикла перспективной продукции, которые выбираются таким образом, чтобы обеспечить решение задачи (5).

Решение задачи (5) позволит существенно снизить значения функций $\Phi_n(\xi_n(\omega), u_n)$, что, в свою очередь, позволит оптимизировать затраты на всех этапах жизненного цикла продукции. Кроме того, наличие цифровых реперов в жизненном цикле продукции позволяет существенно снизить дисперсии случайных величин $D[\xi_n(\omega)]$. Это дает математические основания для решения стохастической задачи (2), когда случайные величины, входящие в задачу (1) заменяются их математическими ожиданиями.

Таким образом, использование двухэтапной оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции позволяет сформулировать эффективную методику решения задачи оптимизации затрат при реализации жизненного цикла изделия, реализуемую в несколько этапов.

I этап. Построение цифровых реперов жизненного цикла продукции при помощи цифровой модели изделия. Результатом данного этапа становится сформированная последовательность векторов (3).

II этап. Построение числовых функционалов для оценки соответствия реальных результатов выполнения этапов жизненного цикла продукции числовым характеристикам, согласно построенным на предыдущем этапе цифровым реперам (4).

III этап. Решение первой оптимизационной задачи (1), состоящей в выборе оптимального управляющего воздействия на каждом этапе жизненного цикла изделия с целью минимизации функционалов Ψ_n .

Для этого решаем экстремальную задачу (5) и в результате получаем оптимальные (или близкие к оптимальным) управленческие решения:

$$v^*_1, v^*_2, \dots, v^*_N.$$

IV этап. Выделяем случайные факторы, влияющие на затраты на каждом конкретном жизненном этапе изделия. В результате анализа случайных факторов, влияющих на увеличение затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции, строим случайные величины:

$$\xi_1(\omega), \xi_2(\omega), \dots, \xi_N(\omega).$$

V этап. Для каждой случайной величины, полученной на предыдущем этапе, необходимо найти ее функции распределения. Вычисляем математическое ожидание и дисперсию для каждой из случайных величин:

$$E_n = E[\xi_n(\omega)],$$

$$D_n = D[\xi_n(\omega)], n = 1, 2, \dots, N.$$

Следует убедиться, что полученные значения дисперсии D_n имеют достаточно малые значения. В противном случае необходимо вернуться на III этап данной методики для решения первой оптимальной задачи (1).

VI этап. Решение второй оптимизационной задачи (2), состоящей в нахождении оптимальных управленческих решений следующей экстремальной задачи:

$$F(u_1, u_2, \dots, u_N) = \Sigma (F_n(u_n) + \Phi_n(E_n, u_n)) \rightarrow \min.$$

Далее необходимо вычислить оптимальные значения управленческих решений:

$$u^*_1, u^*_2, \dots, u^*_N.$$

Затем найдем значение оптимизированных затрат жизненного цикла перспективного изделия по формуле:

$$\Sigma (F_n(u^*_n) + \Phi_n(E_n, u^*_n)).$$

Результатом выполнения этапов описанной методики использования цифровой модели продукта в решении задачи оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции станет получение оптимального плана реализации жизненного цикла перспективной продукции.

Заключение

Описанная в статье экономико-математическая модель оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции на основе использования цифровой модели изделия позволяет оценивать управленческие решения на этапах жизненного цикла изделия и тем самым снижать общие затраты на всех этапах жизненного цикла перспективной продукции. Разработанная методика использования цифровой модели продукта в решении задачи оптимизации затрат на этапах жизненного цикла перспективной продукции основана на двухэтапной стохастической оптимизации и помогает рассчитать оптимальные управленческие ресурсы, которые будут снижать затраты на этапах жизненного цикла перспективной продукции. Для построения и уточнения экстремальных задач оптимизации затрат на этапах жизненного цикла изделия рекомендуется использовать цифровую модель изделия, на основании которой в дальнейшем производится формирования цифровых реперов, обеспечивающих эффективное решение оптимизационных задач.

ИСТОЧНИКИ:

1. Абрамова Е.А. Цифровая экономика как ключевой фактор эффективного управления современными бизнес-процессами // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством, 2018. – № 4(38).
2. Батьковский А.М., Леонов А.В., Пронин А.Ю. Метод оценки готовности высокотехнологичной продукции к промышленному изготовлению // Статистика и Экономика, 2018. – № 1. – doi: 10.21686/2500-3925-2018-1-70-77 .
3. Бианкина А.О. Цифровые технологии и их роль в современной экономике // Экономика и социум: современные модели развития, 2017. – № 16.
4. Богинский А.И., Чурсин А.А. Алгоритм минимизации технологической себестоимости производства детали в зависимости от допусков на ее изготовление // Сегодня и завтра Российской экономики, 2018. – № 87–88.. – doi: 10.26653/1993-4947-2018-87-88-03 .
5. Богинский А.И., Ученев А.А., Чурсин А.А. Оценка эффективности создания организационно-экономической системы управления // Экономика и управление, 2019. – № 2.
6. Борщ Л.М., Герасимова С.В., Тюлин А.С. О вопросах трансформации экономики и модернизации технологических процессов в России // Креативная экономика, 2018. – № 6. – doi: 10.18334/ce.12.6.39206 .
7. Кагарманова А.И., Файзуллина Г.К. Направления по оптимизации затрат предприятия // Аллея науки, 2018. – № 11(27).
8. Каплюченко В.Н., Хлыновский А.М., Долгушев Н.В., Морозов Б.М. Системный подход: от инновационной идеи к рыночному предложению // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление, 2017. – № 4(37).
9. Кузнецов Л.А. Модели инновационного развития в контексте цифровой трансформации бизнеса// Инновации и инвестиции, 2018. – № 9.
10. Кулешенко П.В. Направления оптимизации затрат при разработке новых космических систем в России // Решетневские чтения, 2018. – № 22.
11. Куликова Е.И. Модернизация бизнеса компании под влиянием цифровых технологий // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент, 2019. – № 2. – doi: 10.18101/2304-4446-2019-2-24-30 .
12. Логвинов В.И., Минаков Д.Е., Минаков Е.Ю. Решения для оптимизации эксплуатационных затрат // Автоматика, связь, информатика, 2018. – № 5.
13. Нестеров Е.А., Богинский А.И., Чурсин А.А., Юдин А.В. Основы теории и практики опережающего развития высокотехнологичной корпорации // Горизонты экономики, 2019. – № 1(47).
14. Никитин С.А., Морозова О.И., Семенихина А.В. Перспективное планирование промышленных предприятий на основе статистического моделирования // Управленческий учет, 2018. – № 5.
15. Розанова Н.М., Линева И.В. Цифровая модель для современного бизнеса // Журнал экономической теории, 2019. – № 1. – doi: 10.31063/2073-6517/2019.16-1.5 .

16. Стрельцов А.В., Яковлев Г.И. Инновационное развитие промышленных предприятий за счет военно-гражданской интеграции // Инновационная деятельность, 2017. – № 3(42).
17. Chursin A., Vlasov Y. Innovation as a basis for competitiveness: Theory and practice. – Heidelberg: Springer International Publishing, 2016.
18. Chursin A., Tyulin A. Competence management and competitive product development: Concept and implications for practice. - Heidelberg: Springer International Publishing, 2018.

REFERENCES:

- Abramova E.A. (2018). *Tsifrovaya ekonomika kak klyuchevoy faktor effektivnogo upravleniya sovremennymi biznes-protsessami* [The digital economy as a key factor in the effective management of modern business processes]. *News of Higher Educational Institutions. Series Economics, Finance and Production Management*. (4(38)). (in Russian).
- Batkovskiy A.M., Leonov A.V., Pronin A.Yu. (2018). *Metod otsenki gotovnosti vysokotekhnologichnoy produktsii k promyshlennomu izgotovleniyu* [Method for assessing the readiness of high-tech products for industrial production]. *Statistika i Ekonomika*. 15 (1). (in Russian). doi: 10.21686/2500-3925-2018-1-70-77 .
- Biankina A.O. (2017). *Tsifrovye tekhnologii i ikh rol v sovremennoy ekonomike* [Digital technologies and their role in the modern economy]. *Ekonomika i sotsium: sovremennye modeli razvitiya*. (16). (in Russian).
- Boginskiy A.I., Chursin A.A. (2018). *Algoritm minimizatsii tekhnologicheskoy sebestimosti proizvodstva detali v zavisimosti ot dopuskov na ee izgotovlenie* [Algorithm to minimize the technological cost of manufacturing the part depending on the tolerances of its manufacture]. *Today and tomorrow of the Russian economy*. (in Russian). doi: 10.26653/1993-4947-2018-87-88-03 .
- Boginskiy A.I., Uchenov A.A., Chursin A.A. (2019). *Otsenka effektivnosti sozdaniya organizatsionno-ekonomicheskoy sistemy upravleniya* [Evaluation of the effectiveness of creation of organizational-economic system management]. *Economics and management*. 1 (2). (in Russian).
- Borsch L.M., Gerasimova S.V., Tyulin A.S. (2018). *O voprosakh transformatsii ekonomiki i modernizatsii tekhnologicheskikh protsessov v Rossii* [On the questions of transformation of economics and modernization of technological processes in Russia]. *Creative economy*. 12 (6). (in Russian). doi: 10.18334/ce.12.6.39206 .
- Chursin A., Tyulin A. (2018). *Competence management and competitive product development: Concept and implications for practice* Heidelberg: Springer International Publishing.

- Chursin A., Vlasov Y. (2016). *Innovation as a basis for competitiveness: Theory and practice* Heidelberg: Springer International Publishing.
- Kagarmanova A.I., Fayzullina G.K. (2018). *Napravleniya po optimizatsii zatrat predpriyatiya* [Areas for cost optimization of the enterprise]. *Alley of Science*. 4 (11(27)). (in Russian).
- Kaplyuchenko V.N., Khlynovskiy A.M., Dolgushev N.V., Morozov B.M. (2017). *Sistemnyy podkhod: ot innovatsionnoy idei k rynochnomu predlozheniyu* [System approach: from an innovative idea to market offer]. *Ustoychivoe innovatsionnoe razvitie: proektirovanie i upravlenie*. 13 (4(37)). (in Russian).
- Kuleshenko P.V. (2018). *Napravleniya optimizatsii zatrat pri razrabotke novykh kosmicheskikh sistem v Rossii* [Directions of cost optimization in the development of new space systems in russia]. *Reshetnevskie chteniya*. 2 (22). (in Russian).
- Kulikova E.I. (2019). *Modernizatsiya biznesa kompanii pod vliyaniem tsifrovoy tekhnologii* [Business modernization under the influence of digital technologies]. *Bulletin of the Buryat State University. Economics and management*. (2). (in Russian). doi: 10.18101/2304-4446-2019-2-24-30 .
- Kuznetsov L.A. (2018). *Modeli innovatsionnogo razvitiya v kontekste tsifrovoy transformatsii biznesa* [The model of innovative development in the context of digital business transformation]. *Innovation and Investment*. (9). (in Russian).
- Logvinov V.I., Minakov D.E., Minakov E.Yu. (2018). *Resheniya dlya optimizatsii ekspluatatsionnykh zatrat* [Solutions to optimize operating costs]. *Avtomatika, svyaz, informatika*. (5). (in Russian).
- Nesterov E.A., Boginskiy A.I., Chursin A.A., Yudin A.V. (2019). *Osnovy teorii i praktiki operezhayuschego razvitiya vysokotekhnologichnoy korporatsii* [Fundamentals of theory and practice of advanced development of high-tech corporation]. *Horizons of the economy (Gorizonty ekonomiki)*. (1(47)). (in Russian).
- Nikitin S.A., Morozova O.I., Semenikhina A.V. (2018). *Perspektivnoe planirovanie promyshlennykh predpriyatiy na osnove statisticheskogo modelirovaniya* [Advance planning of industrial enterprises on the basis of statistical modelling]. *Management accounting*. (5). (in Russian).
- Rozanova N.M., Lineva I.V. (2019). *Tsifrovaya model dlya sovremennogo biznesa* [Digital Model for a Contemporary Business]. *Journal of Economic Theory*. 16 (1). (in Russian). doi: 10.31063/2073-6517/2019.16-1.5 .
- Streltsov A.V., Yakovlev G.I. (2017). *Innovatsionnoe razvitie promyshlennykh predpriyatiy za schet voenno-grazhdanskoy integratsii* [Innovative development of industrial enterprises through civil-military integration]. *Innovation activity*. (3(42)). (in Russian).